نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۴- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۴

بررسی روش‌های مناسب حفاری چندمرحله‌ای ایستگاه‌های زیرزمینی عمیق مطالعه موردی ایستگاه x7 خط هفت مترو تهران

سعید حجازی راد [۱*]؛ نوید گنجیان[۲]؛ محمدرضا منصوری[۲]

۱- دانشجوی دکترای تخصصی مهندسی ژئوتکنیک؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۴/۰۵؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی

ایستگاه مترو
روش حفاری
روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی
روش گالری‌های کناری
روش آلمانی
نشست سطح زمین

چکیده

امروزه با توجه به گسترش روز افزون محیط‌های شهری، افزایش تراکم سازه‌های سطحی و کمبود فضای لازم برای حمل و نقل درون شهری، نیاز به اجرای سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو در محیط‌های شهری بیش از گذشته احساس می‌شود. یکی از عوامل حائز اهمیت در اجرای ایستگاه‌های عمیق مترو در محیط‌های شهری انتخاب روش مناسب حفاری است که تأثیر به سزایی در پایداری فضای اطراف تونل در حین حفاری، نشست‌های سطحی ناشی از حفاری و همچنین پایداری درازمدت محیط حفاری شده (ایستگاه مترو) دارد. در این تحقیق با توجه به خصوصیات ژئوتکنیکی زمین و هندسه ایستگاه مورد بررسی، سه روش رایج در حفاری تونل‌های بزرگ مقطع، شامل روش‌های پیش‌نگهدارنده طاق‌بتنی، گالری‌های‌کناری و آلمانی جهت اجرای ایستگاه‌های زیرزمینی از نظر پایداری فضا، تغییر مکان‌های محیطی تونل و نشست ناشی از فرآیند حفاری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است. مدلسازی عددی روش‌های مختلف اجرای این فضا با استفاده از روش اجزای محدود و نرم افزار سه بعدی *Plaxis 3D Tunnel* انجام شده است. با توجه به نتایج، حداکثر نشست سطح زمین در روش گالری‌های‌کناری بوده و حداقل آن مربوط به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی می‌باشد. همچنین نشست سطح زمین در پایان اجرای طبقه اول ایستگاه در دو روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و آلمانی مقادیر بسیار نزدیک به هم داشته و امکان استفاده از هر دو روش را در ایستگاه‌های یک طبقه نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

احداث فضاهای زیرزمینی بزرگ همچون ایستگاه‌های مترو با توجه به سست بودن زمین و سطح مقطع بزرگ این محیط‌ها، باعث ایجاد تغییراتی در محیط اطراف و در نتیجه ایجاد نشست در سطح زمین شده که برای سازه‌های سطحی و زیر سطحی مخاطراتی به دنبال دارد. لذا بایستی علاوه بر پایداری این فضاها، تغییر مکان‌های اطراف نیز تا حد امکان پیش‌بینی و کنترل شوند. اصولاً هنگام حفاری در مناطق شهری سعی بر این است که حفاری به گونه‌ای صورت پذیرد که نشست در سطح حداقل بوده و کمترین آسیب به ساختمان‌های سطحی و زیرسطحی وارد آید **[1].**

از نظر طبقه‌بندی کلی، موقعیت ایستگاه‌ها به دو دسته زیرزمینی و روزمینی تقسیم می‌شوند. اصولاً عمق ایستگاه بر اساس تراز ریل تونل تعیین می‌شود. در شرایطی که پروفیل طراحی شده در مسیر مترو در روی زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت روزمینی و در شرایطی که پروفیل طراحی شده مسیر مترو در تراز زیر سطح زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت زیرزمینی طراحی می‌شود. به طور کلی سه نوع ایستگاه زیرزمینی در شبکه مترو پیش‌بینی می‌شود که تقسیم‌بندی آن‌ها به شرح زیر است [۲]:

الف-ایستگاه کم عمق (*Shallow Station*) : عمق ریل تا سطح زمین کمتر از ۱۳ متر می‌باشد.

* تهران، میدان پونک، انتهای بزرگراه اشرفی اصفهانی به سمت حصارک، میدان دانشگاه آزاد اسلامی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم وتحقیقات تهران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، طبقه‌ی دوم، کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵/۷۷۵؛ شماره‌ی تلفن: ۴۴۸۶۸۴۲۸-۰۲۱؛ نمابر: ۴۴۸۶۵۱۰۵-۰۲۱؛ رایانامه: Hejazi.saied@yahoo.com

ب-ایستگاه نیمه عمیق (*Medium Depth Station*) : عمق ریل تا سطح زمین بین ۱۳ تا ۲۰ متر می‌باشد.

پ-ایستگاه عمیق (*Deep Station*) : عمق ریل تا سطح زمین بیشتر از ۲۰ متر می‌باشد.

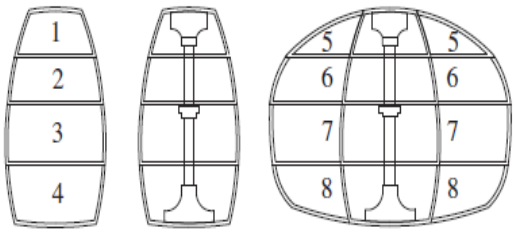
یکی از مواردی که در پایدارسازی فضاهای حفاری شده زیرزمینی موثر است تقسیم‌بندی سطح مقطع حفاری و حفاری مرحله‌ای است تا آن که تونل به صورت تمام مقطع حفاری شود. به طور کلی در این روش سطح مقطع کلی به بخش‌ها و جبهه کارهای کوچکتر تقسیم شده و عملیات اجرا در جبهه‌های مختلف، با گام‌ها و فواصل معین نسبت به هم پیش می‌رود تا فضای حفاری کمترین آسیب را ببیند **[3]**. الگوهای مختلفی جهت تعیین ترتیب حفاری در این روش‌ها توسط کارشناسان مختلف ارایه شده که این الگوها بسته به شرایط زمین‌شناسی، ابعاد مقطع حفاری، وضعیت آب‌های زیرزمینی، ارتفاع روباره و غیره می‌توانند بهینه شوند. از مرسوم‌ترین این روش‌ها در حفاری ایستگاه‌های مترو می‌توان به روش گالری‌های کناری (موسوم به شاخ بزی در ایران)، دیافراگم میانی، روش آلمانی، روش برش‌گرد، روش حفاری تمام‌مقطع، سیستم پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و روش‌های ترکیبی ابداعی اشاره کرد. با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محدوده، عمق نسبتا زیاد ایستگاه (عمق ۳۵ متری از سطح زمین)، هندسه فضای مورد بحث، عدم امکان اصلاحات موقت ترافیکی و میزان اثرگذاری روش حفاری بر نشست سطح زمین و آشفتگی تنش محیط پیرامون، سه‌روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی، روش گالری‌های کناری و روش آلمانی برای حفاری فضای مورد نظر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش‌های متداول احداث تونل های بزرگ مقطع در محیط های شهری

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای حفاری فضاهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش حفاری مرحله‌ای بعد از حفاری تدریجی فضای زیرزمینی و حصول یک تغییر شکل مجاز، باید یک سیستم نگهداری مناسب نصب شود. نوع عملکرد در این روش به شرایط خاک اطراف فضای زیرزمینی وابسته است. بر اساس میزان همگن بودن خاک، می‌توان به صورت کامل یا بخشی از فضای زیرزمینی را حفاری نمود **[4]**.

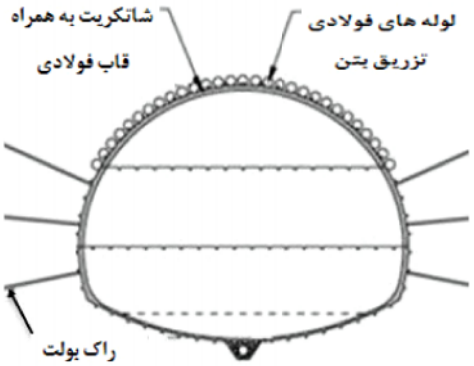
یکی از روش‌های موثر در کاهش نشست سطح زمین روش حفاری مرحله‌ای با ستون‌های میانی است. در این روش همان طور که در شکل ۱، نشان داده شده است، ابتدا فضای مورد نظر برای اجرای ستون‌های میانی به صورت مرحله‌ای حفاری می‌شود و پس از اجرای ستون‌ها، حفاری فضای مورد نظر در پناه این سازه نگهبان با ایمنی بالا صورت می‌گیرد **[5]**.

از این روش برای حفاری تونل در شرایطی که فضای مورد نظر هنگام حفر برای قرارگیری ستون ها پایدار بوده و شرایط محیطی تونل خشک باشد، استفاده می‌شود **[5]**.



شکل ۱- مراحل اجرای روش حفاری با ستون های میانی[5]

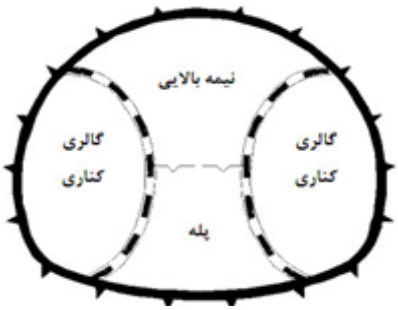
روش پیش‌طاق چتری از دیگر روش‌های حفاری فضاهای زیر زمینی با مقطع بزرگ است که جزء دسته روش‌های پیش‌مهار قرار می‌گیرد تا ناحیه‌ای را که هنوز جبهه حفاری به آن نرسیده، محافظت کند. بنابراین انتظار می‌رود که تاثیر بسزایی در کاهش نشست‌ها داشته باشد. در این روش حفاری همان طور که در شکل ۲، نشان داده شده است، ابتدا دستگاه گمانه‌زن سوراخ‌هایی را در طاق تونل با داشتن اندکی زاویه انحراف نسبت به افق (معمولا بین ۵-۱۰ درجه) حفر می‌کند، سپس لوله یا میله‌های فولادی در این سوراخ‌ها قرار داده می‌شود و مابقی فضای گمانه‌ها با استفاده از ملات پر می‌شود. این گمانه‌ها طوری در طاق تونل ایجاد می‌شوند که فضایی به شکل یک چتر را در طاق تونل پوشش می‌دهند**[6]**.



شکل ۲- مراحل اجرای روش پیش‌طاق چتری [6]

از دیگر روش‌ها می‌توان به استفاده از پیش‌طاق با لوله‌های خمیده قطور که ابتدا در پروژه‌ای در توکیو برای حفاری بخش ورودی و خروجی تونل استفاده شد، اشاره کرد. در این روش قبل از حفاری فضای زیرزمینی، لوله‌های فولادی خمیده با قطر بالا به منظور انجماد در محل‌های مورد نظر تعبیه شده و با انجماد خاک در محل، سیستم نگهداری موقت جهت حفاری فضای تونل مهیا می‌گردد **[7]**.

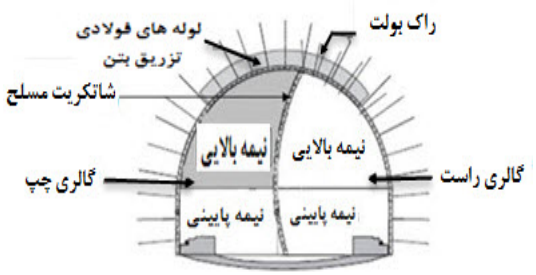
از روش گالری‌های کناری نیز در زمین‌های سست و از طریق کاهش سطح مقطع حفاری در هر مرحله بهره می‌گیرند، که نتیجه آن کاهش پتانسیل ناپایداری در جبهه‌کار حفاری است. در این شیوه نیاز به مراحل ساخت و حفاری زیادی است که نتیجه آن کاهش نرخ پیشروی است. استفاده از ۴۰-۳۵ سانتی‌متر مش و شاتکریت و نصب پیچ‌هایی به طول ۴ تا ۶ متر از ویژگی‌های این روش است. گهگاه از میخ‌های فایبرگلاسی جهت تحکیم سینه‌کار استفاده می‌شود. در شکل ۳ روش حفاری گالری‌های کناری نشان داده شده است**[8]**.



شکل ۳- مراحل اجرای روش پیش طاق چتری [8]

ترتیب حفاری در این روش بدین صورت است که ابتدا گالری‌های کناری حفر می‌شوند. نگهداری اولیه که می‌تواند شامل یک لایه شاتکریت مسلح به همراه راک‌بولت‌های ۴ تا ۶ متری باشد اعمال می‌شود. پوشش نهایی کف و دیواره‌های تونل گذاشته شده و قاب‌های کناری تحکیم می‌شوند. در مرحله بعد نیمه بالایی تونل حفر شده و سیستم نگهداری اولیه اجرا می‌شود. سپس حفر قسمت پایین انجام شده و قاب‌های محافظ تخریب می‌شوند. در آخر پوشش نهایی کف و سقف تونل نیز گذاشته می‌شود.

روش دیگر حفر فضاهای زیرزمنی بزرگ مقطع، روش دیافراگم میانی است که در آن جبهه‌کار حفاری به دو گالری چپ و راست تقسیم شده و قبل از اجرای عملیات حفاری یک لایه شاتکریت مسلح موسوم به دیافراگم، جهت کنترل تغییر شکل‌ها در سقف بین دو گالری کار گذاشته می‌شود. ترتیب حفاری در این روش همان طور که در شکل ۴، نشان داده شده است، بدین صورت است که ابتدا قسمت بالایی گالری سمت راست حفر می‌شود؛ پس از اعمال نگهداری اولیه به دیواره‌ها، قسمت زیرین گالری حفر می‌شود. این عمل تا رسیدن به یک مسافت معین ادامه می‌یابد و سپس حفاری گالری سمت چپ با استفاده از الگوی حفاری مشابه انجام خواهد شد**[9]**.



شکل ۴- ترتیب حفاری در روش دیافراگم میانی[9]

روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی از دیگر روش‌های حفاری ایستگاه‌ها است که در سال ۱۹۷۴ در تونل والدک در آلمان غربی با مقطعی به عرض ۳۳٫۵ متر اجرا شد که بزرگ‌ترین تونل ساخته شده در خاک در آن زمان بود. همچنین این روش در ایران برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ در ساخت ایستگاه ملت از خطوط متروی تهران معرفی شده که پس از موفقیت آن، امروزه به عنوان یکی از روش‌های

اصلی اجرای ایستگاه‌های مترو مطرح می‌شود. مراحل اصلی در این روش عبارتند از:

الف- در ابتدا تونل اولیه با مقطع کوچک در طول فضای زیرزمینی اجرا می‌شود.

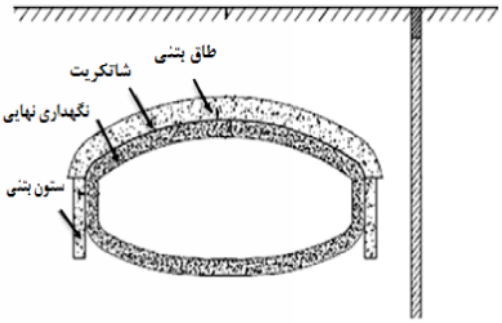
ب- از تونل میانی اجرا شده گالری‌های دسترسی کوچکی به فواصل معین به صورت عرضی به دو طرف، در فضای زیرزمینی اصلی حفاری می‌شود.

پ- از انتهای گالری‌های دسترسی عرضی ایجاد شده، دو گالری جانبی به موازات تونل میانی اولیه و با طولی برابر با فضای زیرزمینی اصلی حفاری می‌شود.

ت- از درون گالری‌های جانبی، ردیفی از شمع‌ها به فواصل معین اجرا می‌شود.

ث- همچنین از بالای شمع‌ها در دو طرف، یک گالری با مقطع نعل اسبی حفاری می‌شود که این گالری برای ایجاد طاق نگهدارنده است که دو شمع مقابل هم در دو طرف محدوده اصلی حفاری را به هم متصل می‌کند.

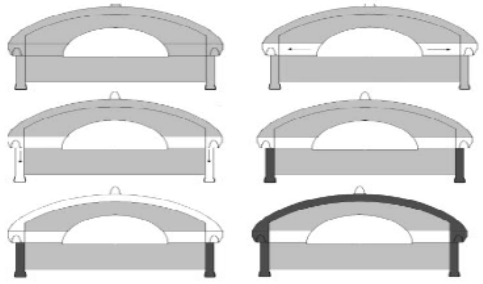
همان طور که در شکل ۵، نشان داده شده است، در این روش المان‌های بتنی مسلح زیرزمینی شامل شمع‌ها و طاق‌های قوسی (ریب)، در اطراف فضای زیرزمینی مورد نظر، پیش از حفاری به منظور نگهداری زمین در حین حفاری اجرا می‌شود **[10]**.



شکل ۵- روش پیش نگهدارنده طاق بتنی [10]

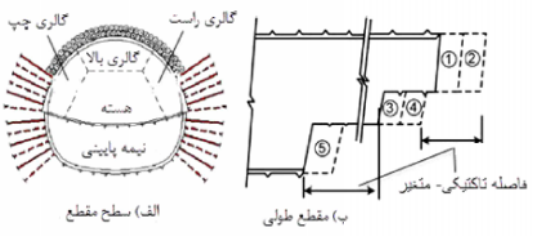
از آن جا که در این روش از شمع‌ها و ریب‌های بتنی جهت ساخت سازه نگهبان استفاده می‌شود به آن، روش ریب بتنی یا شمع و ریب نیز گویند. در شکل ۶، نحوه اجرای این روش به طور شماتیک نشان داده شده است **[11]**.

بدین ترتیب ردیفی از طاق‌های بتنی به موازات هم در زیرزمین ایجاد می‌شوند که به عنوان سازه نگهبان عمل می‌کنند. پس از اجرای شمع‌ها و طاق‌های بتنی، حفاری فضای مورد نظر در پناه این سازه نگهبان با ایمنی بالا صورت می‌گیرد.



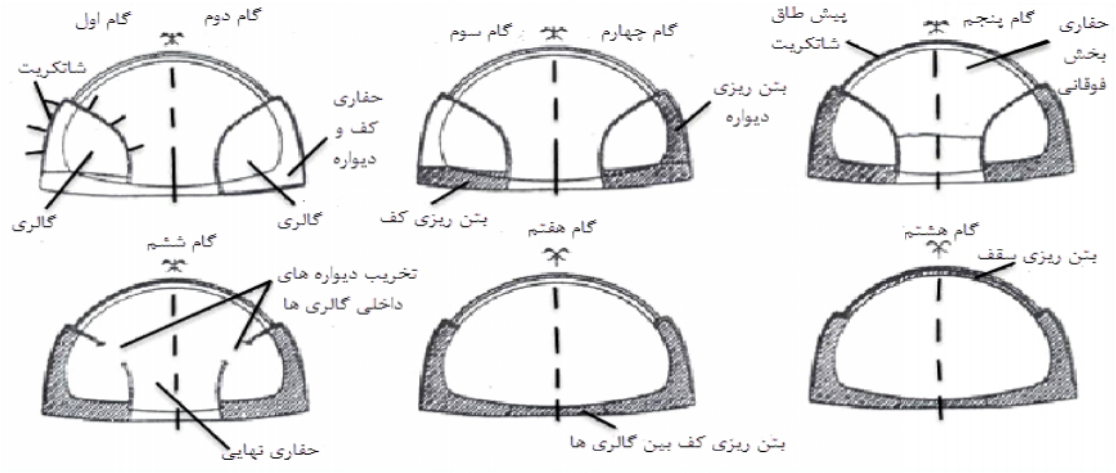
شکل ۶- مراحل اجرای روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی [11]

روش برش گرد نیز یک شیوه معمول جهت پایدارسازی جبهه کار حفاری در زمین‌های نرم است. در این روش با بر جای گذاشتن یک تکه از زمین در کف نیمه بالایی موسوم به هسته، از بالازدگی کف حین حفاری جلوگیری به عمل می‌آید. همان طور که در شکل ۷، نشان داه شده است، ترتیب حفاری در روش برش گرد به این صورت است که ابتدا گالری‌های سمت راست، چپ و بالا در طول مشخصی حفر می‌شوند. پس از حفاری در هر قسمت یک لایه شاتکریت به عنوان نگهداری اولیه به سطوح حفر شده پاشیده می‌شود. پس از دو سیکل حفاری، قسمت هسته برداشته می‌شود. پوشش موقتی کف گذاشته شده و حفر نیمه پایینی با یک فاصله تاکتیکی مشخص از نیمه بالایی شروع می‌شود. این چرخه تا پایان عملیات حفاری ادامه می‌یابد. در زمین‌های نرم می‌توان از روش‌های کمکی همچون فورپولینگ و نیلینگ، جهت پایدار سازی جبهه کار استفاده نمود **[3]**.



شکل ۷- ترتیب حفاری در روش برش گرد [3]

یکی از روش‌های دیگری که برای حفر تونل در زمین‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد روش آلمانی است. نحوه اجرای این روش به این صورت است که ابتدا دو گالری در گوشه‌های پایین تونل حفر می‌شود و پس از نگهداری موقت قسمتی از گالری که با محیط تونل مشترک است بتن‌ریزی می‌شود. در مرحله بعدی قسمت سقف تونل حفر و طی چند مرحله تا کف تونل حفر می‌گردد و پس از تکمیل حفر مقطع، بتن‌ریزی کف نیز انجام می‌شود که به این ترتیب حلقه نگهداری بسته می‌شود. در شکل ۸، مراحل حفاری در روش آلمانی به همراه پیش برش مکانیکی نشان داده شده است **[12]**.



شکل ۸- مراحل حفر در روش آلمانی به همراه پیش‌برش مکانیکی [12]

۳- مشخصات ایستگاه مورد بررسی

پروژه خط هفت متروی تهران از دو امتداد شرقی- غربی و شمالی- جنوبی تشکیل شده است که امتداد شرقی- غربی آن از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج، امتداد یافتن در طول بزرگراه شهید محلاتی و اتصال به میدان قیام در امتداد خیابان مولوی و هلال احمر گسترش یافته و به بزرگراه شهید نواب صفوی می‌رسد. مسیر این خط در امتداد شمالی- جنوبی در طول بزرگراه نواب و سپس در مسیر بزرگراه چمران امتداد یافته و پس از اتصال به میدان صنعت در امتداد بلوار پاک‌نژاد، مسیر تونل تا میدان کاج در سعادت‌آباد ادامه می‌یابد. این خط شامل ۲۵ ایستگاه است که اکثر آن‌ها زیرزمینی هستند. از بین این ایستگاه‌ها، در تحقیق حاضر، ایستگاه x_7 واقع در شمال تقاطع پاکنژاد و بلوار دادمان بررسی شده است. این ایستگاه اکنون در مرحله طراحی بوده و وارد فاز اجرا نشده است **[۱۳]**.

بر اساس آخرین پلان‌ها و پروفیل‌های موجود، طول تونل خط هفت متروی تهران با احتساب ایستگاه‌ها ۲۶٫۷ کیلومتر و بدون احتساب ایستگاه‌ها ۲۲٫۵ کیلومتر خواهد بود. مطالعات ژئوتکنیکی این پروژه در نقاط مناسب از طول مسیر، با حفر ۲۹ حلقه گمانه اکتشافی و ۱۱ حلقه چاهک دستی به منظور بررسی‌های صحرایی و تست‌های آزمایشگاهی انجام شده است **[۱۳]**.

اگر چه امروزه توسعه شهر تهران سبب ساخت و ساز در دامنه‌های سنگی ارتفاعات شمالی نیز شده است، ولی به طور کلی شهر تهران بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته است که حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشا گرفته از ارتفاعات شمالی است. بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده توسط ریبن (*Reiben*) در سال ۱۹۹۵، رسوبات محدوده تهران به چهار گروه A، B، C، D تقسیم‌بندی شده است که در بین آن‌ها به ترتیب رسوبات و نهشته‌های سری A قدیمی‌تر و نهشته‌های سری D جدیدتر هستند. در شکل ۹، نحوه گسترش هر یک از سازندهای آبرفتی در اطراف محدوده ایستگاه مورد بررسی بر روی نقشه زمین‌شناسی گستره تهران نشان داده شده است**[۱۳]**.

شکل ۹- نحوه گسترش سازندهای آبرفتی در اطراف محدوده ایستگاه x_7 بر روی نقشه زمین شناسی تهران [۱۳]

مطابق آخرین بررسی‌های به عمل آمده در محدوده مطالعاتی مورد نظر (ایستگاه x_7)، سطح آب زیرزمینی نسبتاً عمیق بوده و محدوده ایستگاه بالاتر از سطح آب زیرزمینی قرار دارد **[۱۴]**.

طبق گزارشات مطالعات ژئوتکنیک صورت گرفته بر اساس سه لوگ گمانه ماشینی و یک چاهک دستی حفر شده در محل ایستگاه، محدوده ایستگاه x_7 از سه لایه خاک تشکیل شده و وضعیت قرارگیری لایه‌ها که نسبتاً یکنواخت هستند، به صورت زیر است **[۱۴]:**

- تا عمق ۱۰ متر از ماسه رس‌دار همراه با شن *(SC-GC)* تشکیل شده است.
- عمق ۱۰ تا ۱۷ متری محدوده ایستگاه از ماسه رس‌دار همراه با شن *(SC-GC)* که در مواردی مقدار شن افزوده می‌شود تشکیل شده است.
- عمق ۱۷ متری به بعد در محدوده مورد مطالعه از ماسه رس‌دار همراه با شن *(SC-GC)* که نسبت به لایه قبل کمی بر تراکم و مقدار رس آن افزوده شده است.

آزمایش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای مهندسی لایه‌های مختلف خاک منطقه انجام شده است. در مدل‌سازی عددی این ایستگاه از مدل رفتاری خاک سخت شونده که یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار انواع خاک‌های سخت و نرم است، استفاده شده است. خاک موقع قرار گرفتن تحت بارگذاری انحرافی اولیه یک کاهش سختی از خود نشان می‌دهد و به طور همزمان کرنش‌های پلاستیک غیرقابل برگشت توسعه می‌یابند. در یک آزمایش سه محوری زهکشی شده رابطه مشخص شده بین کرنش محوری و تنش انحرافی می‌تواند به وسیله یک هذلولی به خوبی تقریب زده شود. فرق اساسی مدل موهر- کولمب و خاک سخت شونده این است که مدل خاک سخت شونده تابع تنش بودن مدول سختی را لحاظ کرده است. یعنی تمام سختی‌ها با فشار افزایش می‌یابند. ایده اساسی برای فرموله کردن مدل خاک سخت‌شونده رابطه هیپربولیک بین کرنش عمودی ε_1 و تنش انحرافی q در بارگذاری سه محوری اولیه است. در آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده استاندارد منحنی‌های تعریف شده با روابط زیر بدست می‌آیند:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1-\frac{q}{q_a}} \qquad q < q_f \qquad (۱)$$

که q_a مقدار مجانب مقاومت برشی و q_f تنش انحرافی نهایی است. پارامتر E_{50} مدول سختی وابسته به تنش محدود کننده برای بارگذاری اولیه است و از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c\cos\varphi - \sigma_3' \sin\varphi}{c\cos\varphi + p^{ref}\sin\varphi}\right)^m \qquad (۲)$$

که E_{50}^{ref} مدول سختی مطابق با فشار محدود کننده مرجع p_{ref} است. سختی واقعی به تنش اصلی کوچکتر σ_3' که فشار محدودکننده در یک آزمایش سه محوری است،

وابسته است. باید توجه شود که $\sigma_3^{'}$ برای فشار منفی بوده و مقدار وابستگی تنش بوسیله توان m نشان داده می‌شود. به منظور مشابه‌سازی یک وابستگی تنش لگاریتمی مطابق آن‌چه برای رس‌های نرم مشاهده می‌شود، توان m باید برابر یک جای‌گذاری شود. جانبو (*Janbu*) در سال ۱۹۶۳، مقادیر m را در حدود ۰/۵ برای ماسه‌های نروژی و سیلت‌ها گزارش می‌کند. سوس (*Soos*) در سال ۱۹۸۰ نیز مقادیر مختلف برای انواع خاک‌ها، ارایه می‌کند که $0/5 \leq m \leq 1$ است.

تنش انحرافی نهایی، q_f و کمیت q_a در رابطه (۱) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_f = (c\cot\varphi - \sigma_3')\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (۳)$$

$$q_a = {q_f}/{R_f} \quad (۴)$$

همان طور که قبلا نیز بدان اشاره شد σ_3' منفی است. نسبت بین q_a و q_f به وسیله نسبت گسیختگی R_f، داده می‌شود که آشکارا باید از یک کوچکتر باشد. در *PLAXIS*، ۰/۹به عنوان یک پیش فرض مناسب انتخاب شده است.

برای مسیرهای تنش باربرداری و بارگذاری مجدد، مدول سختی وابسته به تنش دیگری استفاده می‌شود:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}\left(\frac{c\cos\varphi - \sigma_3'\sin\varphi}{c\cos\varphi + p^{ref}\sin\varphi}\right)^m \quad (۵)$$

که E_{ur}^{ref} مدول یانگ مرجع باربرداری و بارگذاری مجدد مطابق با فشار مرجع p_{ref} است. در بسیاری از موارد علمی تنظیم $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ مناسب است و این پیش فرضی است که خود *PLAXIS* نیز از آن استفاده می‌کند.

از دیگر پارامترهای مدل سخت شونده می‌توان به E_{oed}^{ref} اشاره کرد که سختی مماسی برای بارگذاری ادئومتر اولیه است. تقریبا $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ است. υ_{ur} نسبت پواسون برای باربرداری و بارگذاری مجدد بوده و همچنین k_0^{nc} مقدار k_0 برای تحکیم عادی است **[15]**. در جدول ۱، پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی عددی این ایستگاه با فرض مدل رفتاری خاک سخت شونده ارایه شده است.

جدول ۱- پارامترهای لایه ها در مدل رفتاری خاک سخت شونده

پارامتر	واحد	خاک *A*	خاک *B*	خاک *C*
عمق	*m*	۰-۱۰	۱۰-۱۷	۱۷>
وزن مخصوص طبیعی γ_{unsat}	(KN/m^3)	۱۸/۷	۲۰	۲۱/۴
مدول الاستیسیته باربرداری E_{ur}^{ref}	(KN/m^2)	۲/۲۶×۱۰^{۵}	۱/۸۴×۱۰^{۵}	۱/۳۳×۱۰^{۵}
مدول الاستیسیته سکانتی E_{50}^{ref}	(KN/m^2)	۷/۵۵×۱۰^{۴}	۶/۱۶×۱۰^{۴}	۴/۴۳×۱۰^{۴}
مدول الاستیسیته ادئومتر E_{oed}^{ref}	(KN/m^2)	۷/۵۵×۱۰^{۴}	۶/۱۶×۱۰^{۴}	۴/۴۳×۱۰^{۴}
چسبندگی C	(KN/m^2)	۵	۱۰	۲۰
ضریب پواسون ϑ_{ur}	-	۰/۲	۰/۲	۰/۲
زاویه اصطکاک داخلی $\emptyset$	*deg*	۳۵	۳۵	۳۲
زاویه اتساع Ψ	*deg*	۳	۳	۰
K_{nc0}	-	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۴۷

۴- روند مدل‌سازی عددی

با توجه به لزوم مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری و تحلیل سه‌بعدی مساله، در این تحقیق از نرم افزار *PLAXIS 3D Tunnel-V1.2* جهت مدل‌سازی عددی استفاده می‌شود.

شایان ذکر است که این نرم‌افزار همان طور که از اسمش پیداست، خاص تحلیل عددی تونل‌ها بوده و قابلیت‌های لازم برای مدل‌سازی کامل مراحل حفاری در روش‌های مختلف اجرایی را دارد.

همان طور که اشاره شد، پس از بررسی کارایی روش‌های مختلف با توجه به شرایط مساله مورد بررسی، در نهایت روش‌های پیش‌طاق بتنی، گالری‌های کناری و روش آلمانی جهت مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های عددی انتخاب گردید. هدف اصلی از این مقایسه‌ها، بررسی کارایی روش‌های مذکور و تعیین مناسب‌ترین روش، با در نظر گرفتن معیارهای مختلف از جمله تغییر مکان‌های اطراف تونل، نشست سطح زمین و توزیع تنش‌ها در اطراف تونل بوده است.

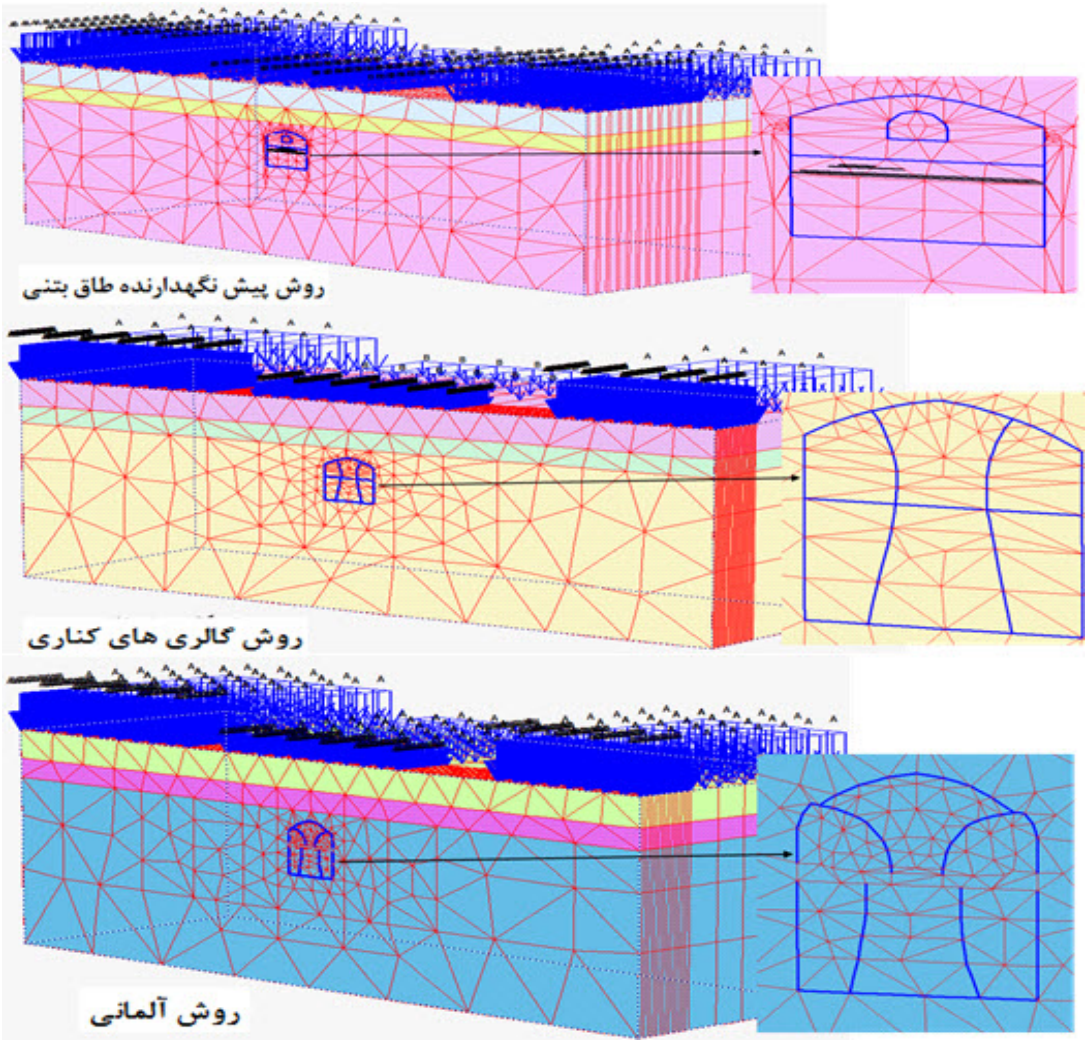
به طور کلی در نرم افزار *Plaxis 3D Tunnel* ، برای مدل‌سازی مناسب، توجه به ساخت هندسه مناسب از مدل، انتخاب محدوده‌ای مناسب از محیط در بر گیرنده، اعمال صحیح شرایط مرزی و همچنین شرایط تنش‌های اولیه، انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن، المان‌بندی مناسب، حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از ایجاد هر گونه تغییراتی در مدل و در نهایت توجه به مراحل و گام‌های اجرا (حفاری و نصب سیستم نگهداری) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اولین مرحله از مدل‌سازی، ساخت هندسه مدل است. ایجاد هندسه در نرم‌افزار *Plaxis 3D Tunnel* به کمک گره‌ها، خطوط و فضای بسته و از طریق دادن مختصات هندسی گوشه‌های مدل صورت می‌گیرد. نکته حائز اهمیت در ایجاد هندسه مناسب، انتخاب محدوده مناسب از محیط در بر گیرنده است. ایده اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط کرش) است که حداکثر زون تأثیر یک حفره زیرزمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است[16]. بدین ترتیب در حالتی که توده سنگ به صورت الاستیک رفتار نماید، در فاصله سه برابر قطر از مرکز حفره، تنش‌ها به حالت اولیه خود می‌رسد. با توجه به این که زمین طبیعی رفتار الاستیک از خود نشان نمی‌دهد و در مساله مورد بررسی محیط پیرامون فضاهای حفاری از جنس سنگ نیست، لذا اقدام به ساخت مدل‌هایی با ابعاد مختلف شده و پلات‌های مربوط به تنش‌ها در اطراف ایستگاه قبل و بعد از حفاری تونل مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت ۵ برابر قطر تونل به عنوان فاصله بهینه از طرفین و فاصله ۳ برابر قطر تونل به عنوان فاصله بهینه از کف انتخاب گردید. در شکل ۱۰، مدل‌های سه بعدی ساخته شده برای سه روش مختلف حفاری، مشاهده می‌شود.

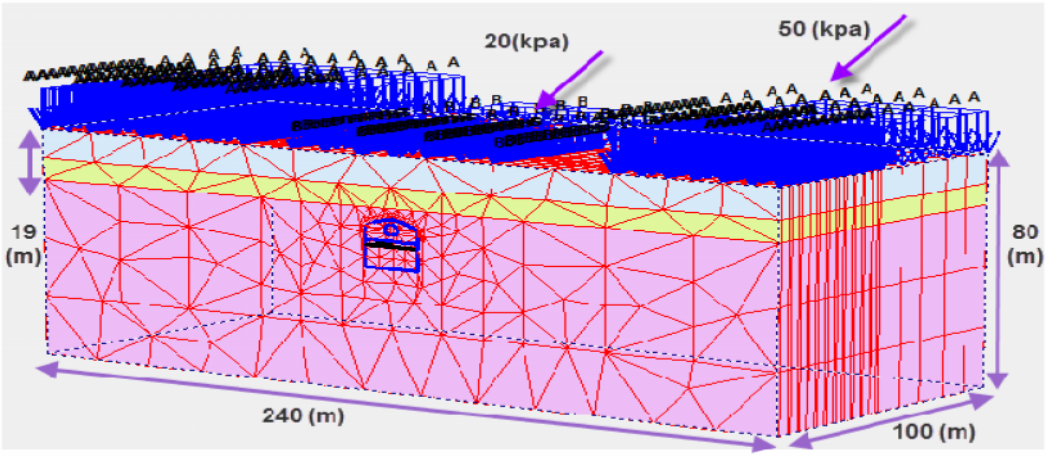
حفاری فضای مورد نظر دقیقا طبق الگویی که در بند یک اشاره شد، انجام شده است. پس از به تعادل رسیدن مدل در هر مرحله از حفر، مرحله بعدی حفر آغاز می‌گردد. به علت بزرگی فضا و شرایط زمین، نگهداری اولیه (شاتکریت) بلافاصله پس از حفاری به سطوح حفر شده پاشیده می‌شود. بر اساس تحقیقات یو *(Yoo)* در سال ۲۰۰۹ در روش‌های حفاری مرحله‌ای گالری‌های کناری و برش گرد طول گام حفاری مناسب حداکثر ۱٫۵ متر با توجه به رابطه‌ای که با قطر تونل دارد در نظر گرفته شده است. این میزان طول پیشروی در این تحقیق با توجه به مقاله ذکر شده و شرایط ایستگاه به میزان ۱٫۲ متر درنظر گرفته شده است. پس از حفر کامل مقطع در هر گام پیشروی، حلقه کامل نگهداری ثانویه (نهایی) نصب شده و سپس حفر متراژ بعدی آغاز می‌شود.

یکی دیگر از فاکتورهای مهم در مدل سازی عددی، نحوه المان بندی و ابعاد المان‌ها است. معمولا هرچه تعداد المان‌های به کار رفته در تشکیل مدل‌های عددی بیشتر باشد، می‌توان انتظار نتایج دقیقتری را داشت. اما از آن‌جا که مدل‌های ساخته شده سه‌بعدی هستند، افزایش تعداد المان‌ها موجب افزایش بسیار زیاد زمان اجرای برنامه می‌شود. در انتخاب ابعاد المان سعی بر این بوده که با استفاده از المان‌های کوچکتر در قسمت‌هایی از مدل که انتظار تغییرات بیشتری در تنش‌ها و کرنش‌های آن‌ها وجود دارد (نواحی اطراف فضای حفر شده) و افزایش تدریجی ابعاد المان‌ها با دور شدن از نواحی یاد شده، حالت بهینه‌ای ما بین دقت حاصل از مدل‌های عددی از یک سو و زمان لازم برای اجرای آن‌ها از سوی دیگر لحاظ شود.

همان طور که در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود، عرض مدل اجزا محدود ساخته شده ۲۴۰ متر، طول(عمق) آن ۱۰۰ متر، ارتفاع آن ۸۰ متر، ضخامت روباره ۱۹ متر و طول حفاری ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰- مدل‌های سه بعدی روش‌های مختلف حفاری ایستگاه



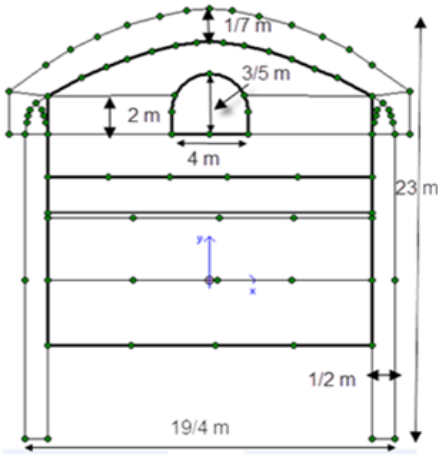
شکل ۱۱- ابعاد شبکه اجزای محدود

لازم به ذکر است با توجه به اینکه سطح آزاد حالت خاصی از تنش مرزی است، بار ترافیکی kPa ۲۰ نیز به منظور اعمال تأثیر بارهای سطحی به صورت گسترده به مرز بالایی مدل در قسمت سطح خیابان وارد می‌شود. همچنین در قسمت‌هایی از مرز بالایی مدل که ساختمان‌های مسکونی قرار دارند بار گسترده معادل kPa ۵۰ اعمال شده است.

پس از برقراری تعادل در شرایط اولیه زمین طبیعی، نوبت به حفر فضاهای مورد نظر و نصب سیستم نگهداری موقت و دایم با توجه به گام‌های حفاری در روش فرضی می‌رسد. این مراحل در فازهای محاسباتی مختلف تکرار شده و در هر گام به منظور رسیدن به تعادل مجدد، مدل اجرا می‌شود.

۴-۱- مدل‌سازی سازه نگهبان ایستگاه در حفاری به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی

به منظور ایجاد و ساخت سازه نگهبان ایستگاه (شمع‌ها و طاق‌های بتنی) ابتدا باید با استفاده از گالری دسترسی اصلی، گالری‌های فرعی(دستک) و گالری‌های جانبی (گالری سر شمع)، فضای کار مناسب جهت احداث شمع‌ها و طاق‌های بتنی را فراهم نمود. شکل ۱۲، مشخصات هندسی ایستگاه x_7 و ابعاد مقاطع که در مراحل مختلف حفاری می‌شوند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- مشخصات هندسی ایستگاه x_7 به همراه مقاطع مختلف حفاری

اگر چه گالری دسترسی اصلی موقت بوده و بعد از ایجاد سازه‌های نگهبان حفاری خواهد شد، اما باید تا اجرای کامل ایستگاه پایدار باشد. با توجه به ابعاد گالری دسترسی اصلی، سیستم نگهداری آن شامل قاب‌های مشبک و شاتکریت است. برای مدل‌سازی این سیستم از المان صفحه در نرم‌افزار استفاده شده و مشخصات مربوط به آن در جدول ۲، ارایه شده است. قابل ذکر است که اعداد و ارقام مربوط به مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی مربوط به ایستگاه x_1 واقع در میدان تجریش است که از این مشخصات در مدل‌سازی ایستگاه x_7 استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات مربوط به شاتکریت گالری اصلی[۱۷]

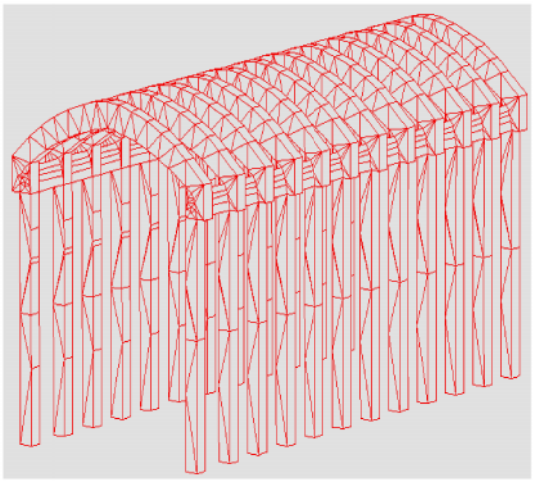
پارامتر	واحد	مقدار
ضخامت t	m	۰٫۲۵
وزن W	$(KN/m/m)$	۶
سختی محوری EA	(KN/m)	۵×۱۰^{۶}
صلبیت خمشی EI	(KNm^2/m)	۲٫۶×۱۰^{۴}
نسبت پواسون ϑ	-	۰٫۲

مشخصات ستون‌ها و طاق‌های نگهدارنده بتنی در جدول ۳، ارایه شده است.

جدول ۳- مشخصات ستون ها و طاق های نگهدارنده بتنی[۱۷]

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص γ	KN/m^3	۲۴
مدول الاستیسیته E	KN/m^2	۲٫۶×۱۰^{۷}
نسبت پواسون ϑ	-	۰/۲

نمای سه بعدی مدل شده سازه نگهبان ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی در نرم‌افزار در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳- نمای سه بعدی ستون‌ها و طاق‌های نگهدارنده بتنی

۴-۲- مدل‌سازی مراحل اجرای ایستگاه در حفاری به روش گالری‌های کناری

برای حفاری ایستگاه به روش مذکور نیاز به نگهداری موقت با قاب‌های مشبک و شاتکریت است. این نگهداری، پایداری قسمت‌های مختلف ایستگاه را در زمان حفاری تامین می‌کند و در نهایت تخریب شده و فضای ایستگاه به صورت کامل حفاری می‌شود. همچنین همان طور که قبلا اشاره شد، طول گام حفاری در این روش ۱٫۲ متر در نظر گرفته شده است.

مشخصات سیستم نگهداری موقت شاتکریت و مش مورد استفاده در روش گالری‌های کناری در جدول ۴، آمده است.

جدول ۴- مشخصات مربوط به شاتکریت در روشگالری های کناری

پارامتر	نماد	واحد	حایل‌های خارجی	حایل‌های داخلی
ضخامت معادل	t	m	۰٫۳۵	۰٫۲۵
وزن حجمی	W	$(KN/m/m)$	۸٫۵	۸٫۵
سختی محوری	EA	(KN/m)	۷٫۳۵×۱۰^{۶}	۵٫۲۵×۱۰^{۶}
صلبیت خمش	EI	(KNm^2/m)	۷٫۵×۱۰^{۴}	۲٫۷۳×۱۰^{۴}
نسبت پواسون		-	۰٫۲	۰٫۲

۴-۳- مدل‌سازی مراحل اجرای ایستگاه در حفاری به روش آلمانی

مراحل حفاری ایستگاه به روش آلمانی عبارتند از:

الف- دو گالری با میزان پیشروی ۱٫۲ متر در هر مرحله در گوشه‌های پایین تونل حفاری می‌شود. بعد از اجرای هر مرحله بلافاصله دیواره‌ها با ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت نگهداری می‌شوند تا از ریزش خاک به محوطه جلوگیری و پایداری اولیه در حین حفاری تامین شود. بولت‌های فلزی و فایبرگلاس بعد از لایه‌های اول و دوم شاتکریت نصب می‌شوند.

ب- بعد از حفاری گالری‌ها نوبت به حفر و بتن‌ریزی کف گالری می‌رسد. ضخامت بتن‌ریزی کف حدود ۱٫۵ متر است.

پ- بعد از اتمام بتن‌ریزی کف محوطه حفر شده، نوبت بتن‌ریزی دیوارهای جانبی می‌رسد. هدف از این کار قرارگیری نگهداری بخش سقف روی این تکیه‌گاه پیش‌ساخته است. لازم به ذکر است که در این روش، نگهداری سقف با روش پیش‌برش مکانیکی صورت گرفته است. ضخامت نگهداری ۳۰ سانتی‌متر و از نوع شاتکریت خشک با مقاومت ۴۵ Mpa است.

ت- بعد از قرارگیری نگهداری سقف نوبت به حفاری بخش بالایی و مرکزی تونل می‌رسد.

ث- در مرحله بعد حفر قسمت بعدی در پایین تونل و

تخریب دیواره‌های داخلی گالری‌ها صورت می‌گیرد.

در نهایت بتن‌ریزی قسمت کف بین گالری‌ها و بستن حلقه نگهداری انجام می‌گیرد.

۵- مقایسه نتایج در حفاری ایستگاه به روش‌های مختلف

حفاری فضای مورد نظر دقیقاً طبق الگوهای ارایه شده در روش‌های مختلف مدل‌سازی شده و در ادامه نتایج حاصل مورد بررسی و مقایسه قرار خواهند گرفت.

۵-۱- نشست سطح زمین و تاج تونل در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی

در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی، برای رسیدن به فواصل بهینه سیستم شمع و ریب‌ها از هم با توجه به تاثیر این فواصل بر روی پایداری فضای زیرزمینی و نشست سطح زمین مدل‌های متفاوتی ساخته شد. در این مدل‌ها فواصل مختلف ۲٫۵، ۲٫۷۵، ۳، ۳٫۲۵، ۳٫۵ و ۴ متر بررسی شده است. بر اساس تحلیل های انجام شده می‌توان گفت:

- میزان ماکزیمم نشست سطحی در حالت فواصل ۲٫۷۵ متر شمع و ریب‌ها، ۳٫۹۴ سانتی‌متر است.
- میزان ماکزیمم نشست سطحی در حالت فواصل ۳ متر شمع و ریب‌ها، ۴٫۴۳ سانتی‌متر است.
- میزان ماکزیمم نشست سطحی در حالت فواصل ۳٫۲۵ متر شمع و ریب‌ها، ۴٫۵۱ سانتی‌متر است.
- میزان ماکزیمم نشست سطحی در حالت فواصل ۳٫۵ متر شمع و ریب‌ها، ۴٫۹۶ سانتی‌متر است.
- میزان ماکزیمم نشست سطحی در حالت فواصل ۴ متر شمع و ریب‌ها، ۵٫۸۷ سانتی‌متر است.

ماکزیمم جابجایی تاج تونل برای فواصل مختلف سازه نگهبان طاق بتنی، مطابق جدول ۵ است.

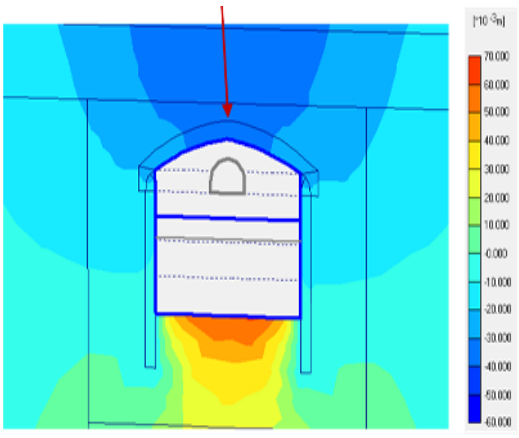
ماکزیمم نشست تاج در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی با فواصل ۲٫۵ متر شمع‌ها و ریب‌ها مطابق شکل ۱۴، ۴٫۱ سانتی‌متر است.

برای مقایسه نشست سطحی، در فواصل مختلف شمع و ریب‌ها سه مقطع در ابتدا، میانه و انتهای حفاری تعیین شده تا نشست در طول روند حفاری به صورت کامل مشخص باشد. در شکل ۱۵، مقایسه نشست‌های سطحی در فواصل مختلف سازه نگهبان در مقطع ابتدایی مشاهده می‌شود. در شکل ۱۶، مقایسه نشست‌های سطحی در فواصل مختلف سازه نگهبان در مقطع در میانه ایستگاه مشاهده می‌شود.

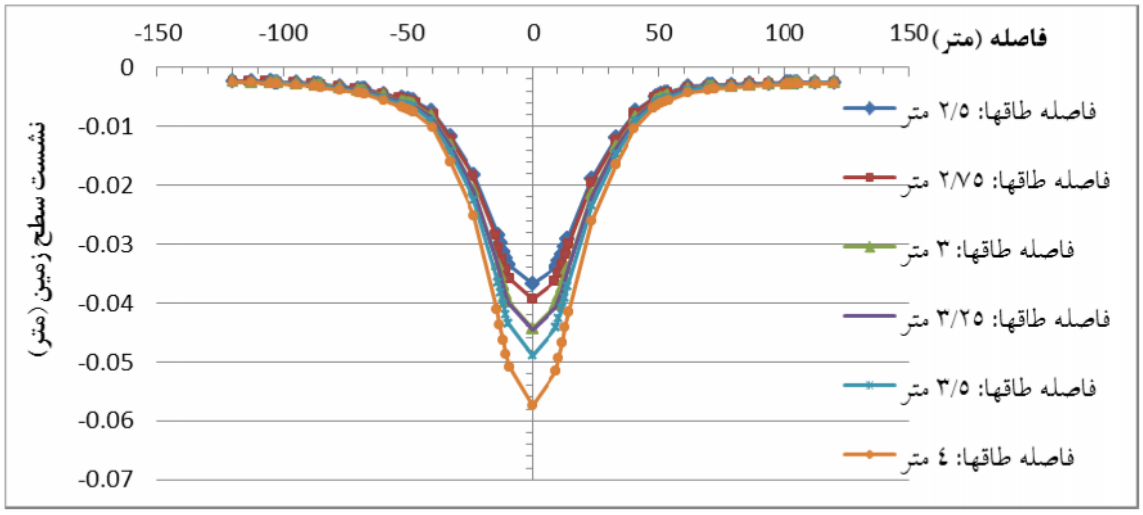
در شکل ۱۷، مقایسه نشست‌های سطحی در فواصل مختلف سازه نگهبان در مقطع انتهایی مدل‌سازی مشاهده می‌شود. تغییرات نشست در این مقطع بسیار مشهودتر است.

جدول ۵- ماکزیمم جابجایی تاج تونل در فواصل مختلف سیستم نگهدارنده بتنی

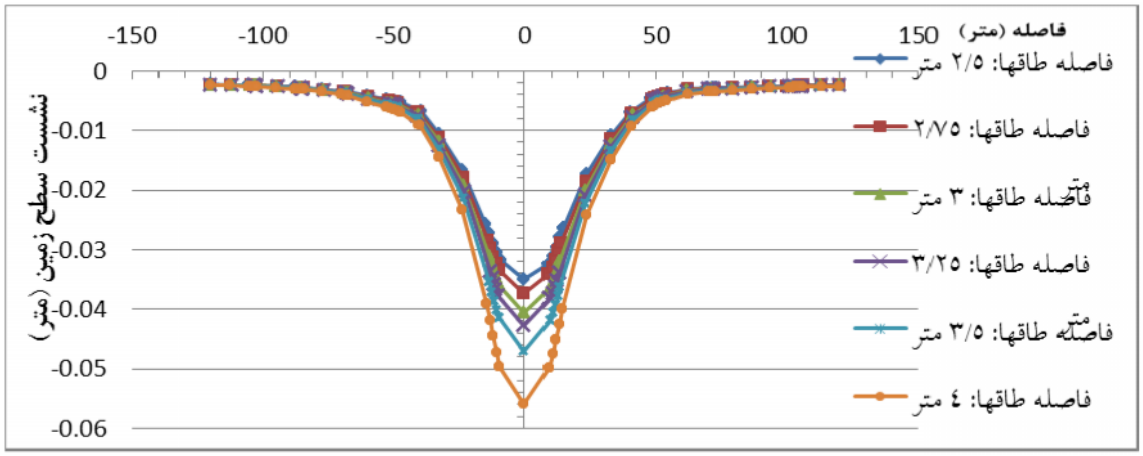
فواصل سیستم نگهدارنده بتنی (متر)	میزان جابجایی تاج تونل (سانتی‌متر)
۲/۵	۴/۱
۲/۷۵	۴/۳
۳	۴/۵
۳/۲۵	۴/۷۲
۳/۵	۵/۴
۴	۵/۸۳



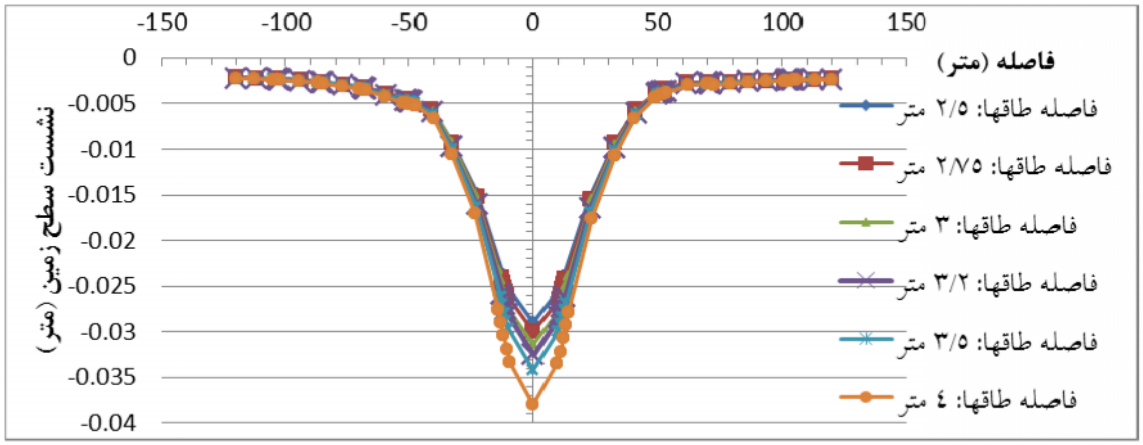
شکل ۱۴- ماکزیمم جابجایی تاج تونل (ایستگاه) در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی با فواصل ۲٫۵ متر



شکل ۱۵ - مقایسه نشست سطحی در فواصل متفاوت سازه نگهبان در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی در مقطع ابتدایی



شکل ۱۶- مقایسه نشست سطحی در فواصل متفاوت سازه نگهبان در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی در مقطع میانی

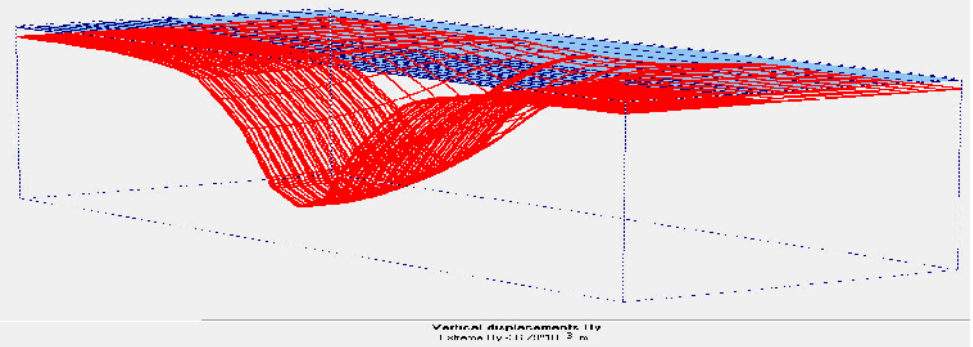


شکل ۱۷- مقایسه نشست سطحی در فواصل متفاوت سازه نگهبان در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی در مقطع انتهایی

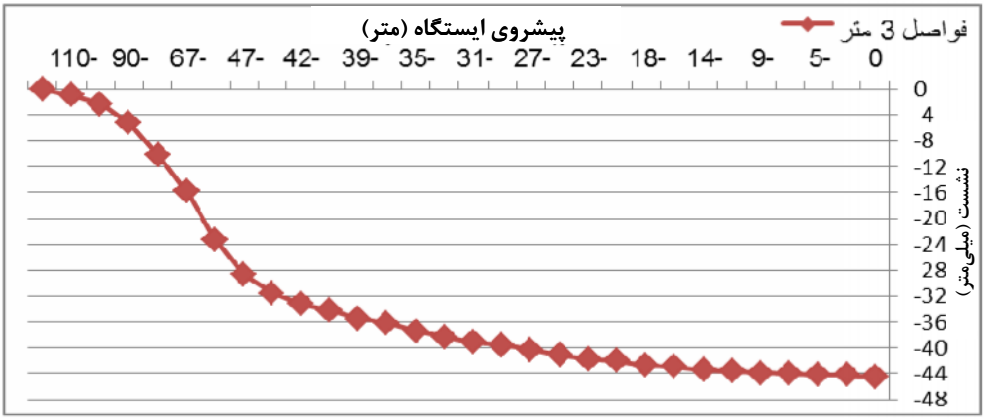
با عنایت به نمودارهای فوق می‌توان دریافت که بیشترین میزان نشست در ابتدای حفاری اتفاق افتاده و این مقدار به مرور در روند حفاری کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۱۸، که نشست سطحی در روش پیش طاق بتنی با فواصل ۲/۵ متر نشان داده شده، این موضوع نمایان است.

همچنین پروفیل نشست طولی سطح زمین مربوط به روش پیش نگهدارنده طاق بتنی با فواصل سه متر در شکل ۱۹، مشخص است.

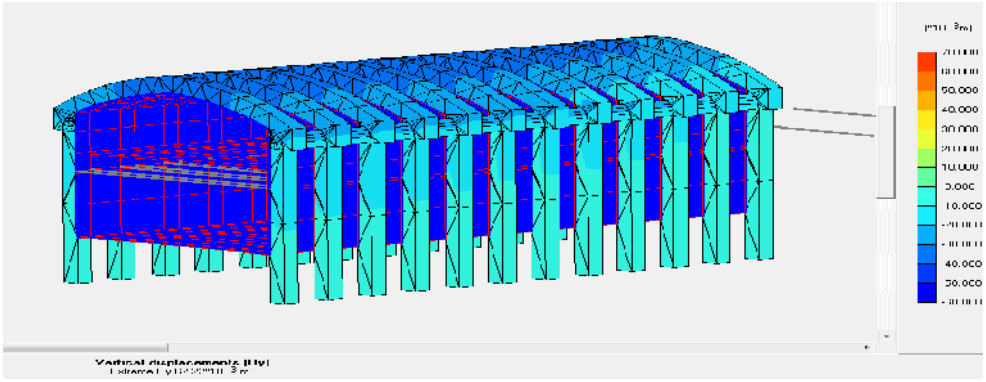
همچنین میزان جابجایی سازه نگهبان ایستگاه در حالت سه بعدی در شکل ۲۰، مشخص است.



شکل ۱۸- نشست سطحی در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی با فواصل ۲/۵ متر



شکل ۱۹- پروفیل نشست طولی سطح زمین در روش پیش نگهدارنده طاق بتنی با فواصل ۳ متر



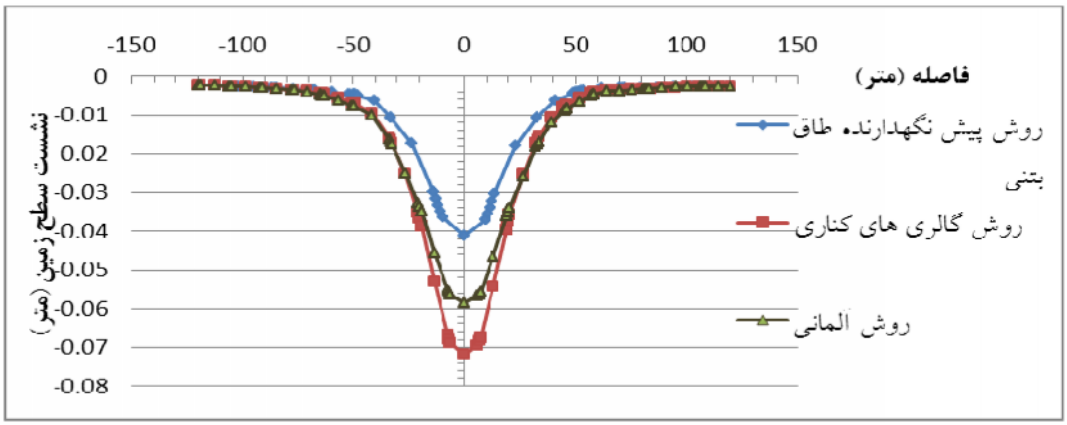
شکل ۲۰- جابجایی سازه نگهبان ایستگاه در حالت سه بعدی

۵-۲- مقایسه نشست سطح زمین و تاج تونل حاصل از روش‌های مختلف حفاری

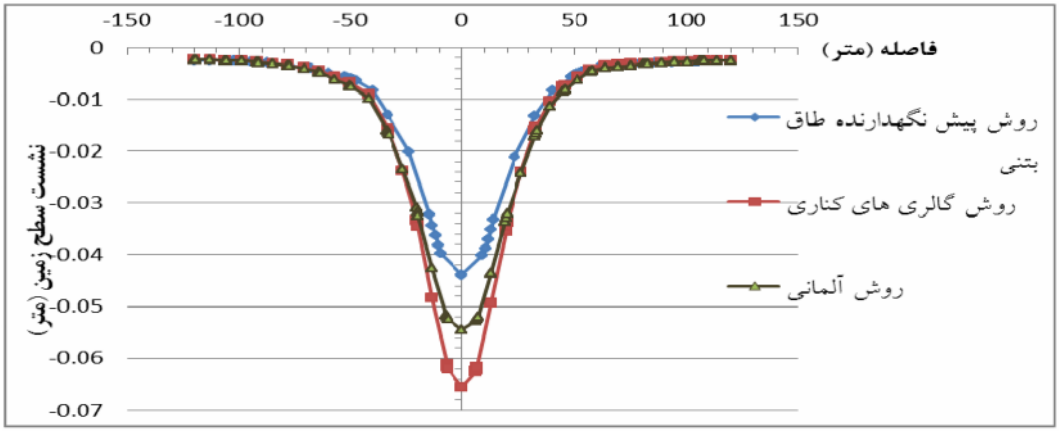
در بخش قبل میزان نشست سطحی و جابجایی تاج تونل در فواصل مختلف شمع و ریب‌ها در روش حفاری پیش نگهدارنده طاق بتنی ارایه شد. در ادامه نتایج حاصل از روش پیش‌نگهدارنده بتنی در حالت فاصله قاب‌های ۳ متر با نتایج روش‌های حفاری آلمانی و گالری‌های کناری مقایسه خواهد شد.

میزان نشست سطح زمین پس از حفاری ایستگاه‌ها یکی از معیارهای اصلی ارزیابی روش‌های اجرا است. برای مقایسه نشست سطح زمین حاصل از روش‌های مختلف حفاری دو مقطع در ابتدا و میانه ایستگاه تعریف و نشست سطح زمین حاصل از سه روش حفاری مختلف با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۲۱، مقایسه نشست سطحی در مقطع ابتدایی نشان داده شده است.

همچنین در شکل ۲۲ مقایسه نشست سطحی در مقطع میانی مدل‌سازی نشان داده شده است.



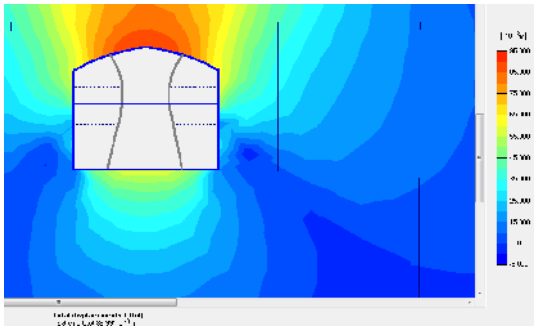
شکل ۲۱- مقایسه نشست سطحی سه روش حفاری متفاوت در مقطع ابتدایی



شکل ۲۲- مقایسه نشست سطحی سه روش حفاری متفاوت در مقطع میانی

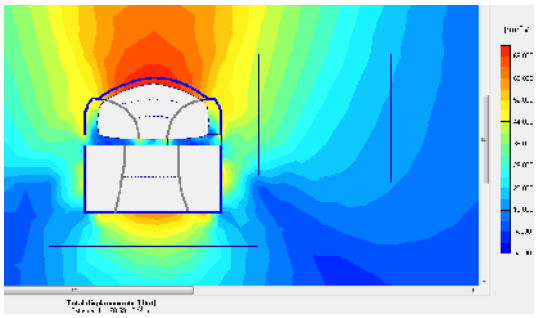
همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین نشست سطحی مربوط به روش گالری‌های کناری بوده و کمترین نشست سطحی مربوط به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی است. روش حفاری آلمانی نیز نشست‌های ما بین این دو را می‌دهد.

ماکزیمم جابجایی تاج تونل در روش گالری‌های کناری مطابق شکل ۲۳، ۸٫۸ سانتی‌متر است.



شکل ۲۳- ماکزیمم جابجایی تاج تونل در روش گالری‌های کناری

همچنین ماکزیمم جابجایی تاج تونل در روش آلمانی مطابق شکل ۲۴، ۷ سانتی‌متر است.



شکل ۲۴- ماکزیمم جابجایی تاج تونل در روش آلمانی

در جدول ۶، ماکزیمم جابجایی‌های تاج تونل (ایستگاه) در روش‌های مختلف حفاری مشخص شده است. همان طور که مشاهده می‌شود بیشترین جابجایی تاج ایستگاه مربوط به روش گالری‌های کناری و کمترین جابجایی تاج ایستگاه مربوط به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی است. روش حفاری آلمانی نیز جابجایی ما بین این دو را نشان داده است.

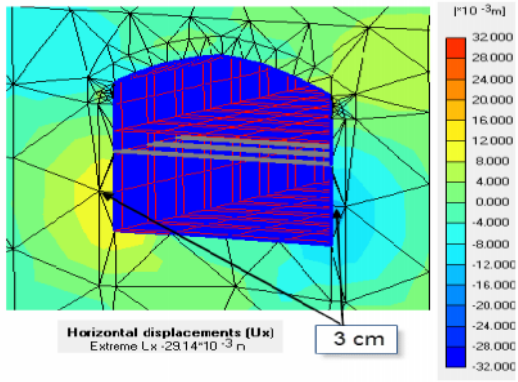
جدول ۶- ماکزیمم جابجایی تاج تونل در روش های حفاری متفاوت

روش حفاری	میزان جابجایی تاج تونل (سانتی‌متر)
روش پیش طاق بتنی (با فواصل ۳ متر)	۴٫۱
روش آلمانی	۷
روش گالری‌های کناری	۸٫۸

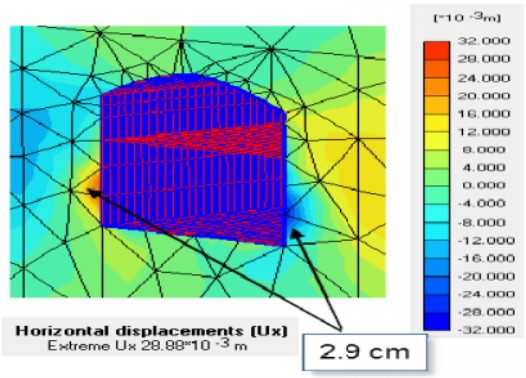
۵-۳- مقایسه جابجایی افقی دیواره های ایستگاه در روش‌های حفاری مختلف

در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی ماکزیمم میزان جابجایی افقی در دیواره‌های ایستگاه در محدوده‌ای که خاک قرار دارد، در حدود ۳ سانتی‌متر است. ولی در محدوده شمع‌ها میزان جابجایی افقی ۱٫۵ سانتی‌متر است. بیشترین جابجایی افقی که مدل در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی با فواصل ۳ متر تجربه می‌کند، ۳ سانتی‌متر است (شکل ۲۵).

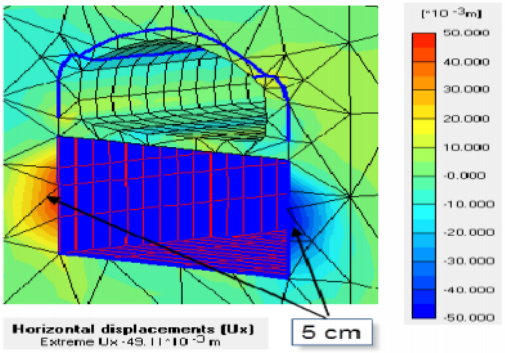
ماکزیمم جابجایی افقی در روش گالری‌های کناری، در حدود ۲٫۹ سانتی‌متر (شکل ۲۶) و در روش آلمانی در حدود ۵ سانتی‌متر (شکل ۲۷) است. میزان جابجایی افقی در روش گالری‌های کناری و روش پیش‌طاق بتنی همان طور که در شکل ۲۵ و شکل ۲۶ مشخص شده به هم نزدیک است.



شکل ۲۵- ماکزیمم جابجایی افقی در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی



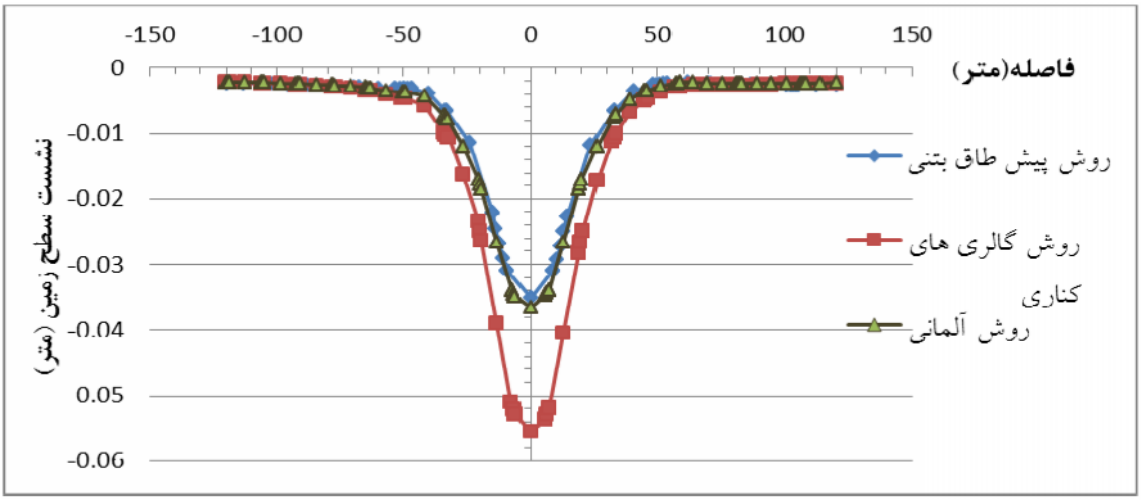
شکل ۲۶- ماکزیمم جابجایی افقی در روش گالری‌های کناری



شکل ۲۷- ماکزیمم جابجایی افقی در روش آلمانی

۴-۵- مقایسه نشست سطحی در پایان حفاری طبقه اول

میزان نشست سطحی در پایان حفاری طبقه اول، در سه روش حفاری مختلف در شکل ۲۸، مقایسه شده است. میزان این نشست‌ها در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و روش آلمانی بسیار نزدیک به هم می‌باشد. نشست‌ها در زمانی ارائه شده‌اند که طبقه اول ایستگاه به صورت کامل حفاری شده است.



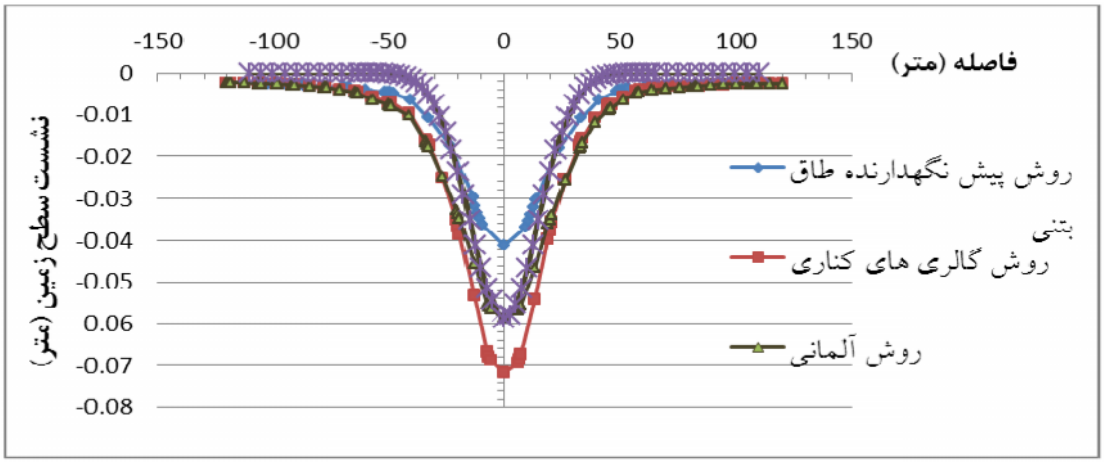
شکل ۲۸- مقایسه نشست سطحی در پایان حفاری طبقه اول

۵-۵- مقایسه نتایج نشست سطحی حاصل از تحلیل‌های عددی و روابط تجربی

فرضیات مورد استفاده برای محاسبه نشست تجربی به این صورت است که، تونل در میان تشکیلات خاکی قرار دارد، روش تونل‌سازی بر اساس الگوی *NATM* است و تغییر شکل‌های بلند مدت وجود ندارد و با بهره‌گیری از روابط پک *(Peck)*، سعی بر ارایه پروفیل نشست سطحی شده است. همچنین قابل ذکر است که به دلیل وجود بار گسترده سطحی یکپارچه در تمام محدوده ایستگاه می‌توان آن را معادل چند متر خاک در نظر گرفت و اثر سازه را حذف کرد. با در نظر گرفتن این مطلب از رابطه پک برای مقایسه با روش عددی استفاده شده است.

پروفیل مقایسه نشست زمین بین روش‌های تجربی و عددی در شکل ۲۹، نشان داده شده است.

با مشاهده این نمودارها و مقایسه مقادیر به دست آمده از تحلیل تجربی و عددی مشخص است که این دو روش تطابق خوبی با یکدیگر داشته و نتایج نزدیک به هم است. با این حال، نشست پیش‌بینی شده برای روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده در روش تجربی است. این مقدار در روش آلمانی تقریبا با هم برابر بوده و در روش گالری‌های کناری نشست به دست آمده از مدل‌سازی عددی بیشتر از روش تجربی است.



شکل ۲۹- مقایسه پیش بینی نشست زمین بین روش‌های تجربی و عددی

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه استفاده از روش‌های مختلف اجرای تونل‌های بزرگ مقطع برای اجرای ایستگاه X_7 ، برخی از نتایج حاصل به شرح ذیل قابل بیان است:

الف- روش اجرای تونل از جمله عواملی است که در کنار ابعاد تونل، شرایط زمین‌شناسی، تنش برجا و سازه‌های موجود در منطقه تعیین کننده الگوی نشست سطح زمین و تغییرات تنش در محدوده ایستگاه است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده نوع الگوی حفاری و ترتیب حفاری نواحی مختلف از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.

ب- در روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی به علت سختی بالای مصالح طاق بتنی، بعد از اجرای طاق بتنی، میزان تمرکز تنش در طاق‌ها زیاد بوده و این امر سبب کاهش تغییر شکل‌های پیرامونی ایستگاه و در نتیجه کمتر شدن دست‌خوردگی خاک محیط حفاری می‌شود.

پ- مقاطع مختلف در فرآیند مدل‌سازی نشان می‌دهد که، بیشترین میزان نشست سطح و جابجایی‌های محیطی ایستگاه در ابتدای حفاری اتفاق می‌افتد و با پیشرفت در طول جبهه کار حفاری از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود.

ت- میزان جابجایی قایم تاج تونل بزرگ مقطع، از لحاظ عددی بیشتر از نشست سطح بوده و این امر نشان می‌دهد که با حرکت به سمت سطح زمین از میزان جابجایی‌های قایم کاسته می‌شود.

ث- کمترین جابجایی تاج تونل، مربوط به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و بیشترین آن مربوط به روش گالری‌های کناری است.

ج- بیشترین نشست سطحی ناشی از حفاری ایستگاه مربوط به روش گالری‌های کناری و کمترین نشست سطحی مربوط به روش پیش نگهدارنده طاق بتنی است.

چ- دو روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و گالری‌های کناری کمترین میزان جابجایی افقی دیواره ایستگاه را ایجاد می‌کنند.

ح- در پایان حفاری طبقه اول میزان نشست سطحی و جابجایی تاج ایستگاه در دو روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و روش آلمانی بسیار نزدیک به هم بوده و امکان استفاده از هر دو روش برای اجرای ایستگاه‌های یک طبقه در مصالح درشت دانه با شرایط ایستگاه $X7$ وجود دارد.

خ- با پیشروی در ابتدای حفاری، جابجایی‌ها به سرعت افزایش می‌یابد و به تدریج نرخ افزایشی آن کاسته می‌شود. ضمن این که میزان پیشروی نیز تاثیر بسزایی بر جابجایی‌های دیواره و سقف ایستگاه دارد.

د- نشست محاسبه شده برای روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده در روش تجربی است. این مقدار در روش آلمانی تقریبا با هم برابر بوده و در روش گالری‌های کناری نشست به دست آمده از مدل‌سازی عددی بیشتر از روش تجربی است.

ذ- با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی و مقایسه پارامترهای مختلف از جمله جابجایی سقف و کف ایستگاه و همچنین نشست سطحی زمین در سه روش

پیش‌نگهدارنده طاق بتنی، روش گالری‌های کناری و روش آلمانی می‌توان گفت که روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی شیوه مناسب‌تری جهت اجرای ایستگاه مورد بررسی است.

۷- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
d	m	عمق
	$KN/m3$	وزن مخصوص طبیعی
$Eref_{ur}$	$KN/m2$	مدول الاستیسیته باربرداری
$Eref_{50}$	$KN/m2$	مدول الاستیسیته سکانتی
$Eref_{oed}$	$KN/m2$	مدول الاستیسیته ادئومتر
C	$KN/m3$	چسبندگی
	-	ضریب پواسون
	deg	زاویه اصطکاک داخلی
ψ	deg	زاویه اتساع
t	m	ضخامت
W	$KN/m/m$	وزن
EA	KN/m	سختی محوری
EI	$KNm2/m$	صلبیت خمشی
E	$KN/m2$	مدول الاستیسیته

۸- منبع‌ها

[1] Torano, J., Rodrigues, R., Diego, I., Rivas, J.M. (2006). Estimation of settlements due to shallow tunnels and thier effects, Tunneling and Underground Space Technology.

[۲] مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۹)، بررسی روش اجرای تقاطع خطوط ۳ و ۷.

[3] Yoo, C., (2009). Performance of Multi-Faced Tunnelling – A 3D Numerical Investigation,Tunnelling and Underground Space Technology, 562-573.

[4] Tonon F. (2010). Sequential excavation NATM and ADECO: what they have in common and how they differ. Tunneling and Underground Space Technology. 25(3), 245-265.

[5] Fang, Q., Zhang,D., Wong, L. (2012). Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground, Tunneling and Underground Space Technology. 29, 10-30.

[6] Ocak, I. (2008). Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. Tunnelling and Underground Space Technology. 23, 674-681.

[7] Kunihiko T, Kenichi Y. (2006). The state of affairs of large diameter shield tunnel method for subway and the recent trend of shield technology in Japan, International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, 57-66.

[8] Barla, G. (2002). Tunneling under squeezing rock conditions, Tunneling Mechanics, Advances in

Geotechnical Engineering and Tunneling, 169-268.

[9] Aydin, A., Ozbec, A., Cobanoglu, I., (2004). Tunneling in dificult ground: a case study from Dranaz tunnel. Sinop, Turkey, 293-301.

[10] Sadaghiani, M.H., Dadizadeh, S., (2010). Study on the Effect of a New Construction Method for a Large Span Metro Underground Station in Tabriz-Iran,Tunneling and Underground Space Technology, 63-69.

[11] Sadaghiani, M.H, Taheri, S.R, (2008). Numerical Investigations for Stability Analysis of a Large Underground Station of Tehran Metro, Word Tunnel Congress, Underground Facilities for Better Enviroment and Safety, India.

[12] Oteo, C., Paramer, J., Rodriguez, J., Romana, M. (1996). Construction of twin tunnels 20m width in the Madrid Sands, North American Tunneling, 411-420.

[۱۳] شرکت مهندسی سپاسد، (۱۳۸۹)، گزارش نظام های اجرایی و مصالح خط هفت متروی تهران.

[۱۴] مهندسین مشاور زمین فن آوران، (۱۳۸۶)، مطالعات ژئوتکنیک مقدماتی خط هفت متروی تهران.

[15] Plaxis 3D Tunnel Version 1.2, (2001). *T*utorial *& R*eference *Manual*, Balkema Publishers, Netherlands.

[16] Ward, W.H., Thomas, H.S., (1965). The Development of Earth Loading and Deformation in Tunnel Linings In London clay, Pro of the 6th ICSMFE, Vol.2, Torento, 432-436.

[۱۷] شرکت مهندسی سپاسد، (۱۳۸۸)، گزارش روش اجرای ایستگاه x_1 .